第47卷 第1期
2024年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 1
Jan. 2024

青海公路沿线暴雨洪涝灾害风险指数特征与模型研究

张 静[1]， 保广裕[1]， 刘 玮[1]， 杨春华[1]， 燕振宁[1]， 代青措[1]， 傅永超[2]

（1. 青海省气象服务中心，青海 西宁 810001；2. 青海省祁连县气象局，青海 祁连 810400）

摘 要：利用2012年1月至2021年12月青海省50个国家气象站和39个公路沿线交通气象站地面气象观测中的逐日降水量数据、地理信息数据、社会经济数据，在分析公路沿线暴雨洪涝发生发展规律、时空分布特征和不同强度降雨日数空间分布特征的基础上，采用层次分析法、自然断点法等方法对暴雨洪涝致灾因子风险指数、孕灾环境风险指数、承灾体风险指数、防灾减灾能力风险指数及风险综合指数空间特征进行了总结，并运用公路沿线暴雨洪涝灾害风险的孕灾环境、气象风险及防灾减灾能力等因子，构建了公路沿线暴雨洪涝灾害风险模型。结果表明：(1) 青海省公路沿线不同强度降雨日数空间分布总体呈由东南向西北递减，致灾因子危险性最高风险区至次高风险区路段包括国道G315线的西宁–天峻路段和G227线的西宁–峨堡岭等路段。(2) 暴雨洪涝孕灾环境脆弱性风险自东南、东北向西逐渐降低，孕灾环境脆弱性风险较高的路段包括国道G227线的祁连路段和G214线的共和–囊谦等路段。(3) 承灾体暴露性的最高风险区主要集中在国道G109线的民和–共和路段和G227线的西宁–峨堡岭等路段。(4) 防灾减灾能力较高的区域主要分布在青海省西宁、海东、海北东部和海西西部等路段。(5) 青海省公路沿线暴雨洪涝灾害风险模型等级划分为暴雨洪涝最低风险(1级)、次低风险(2级)、中等风险(3级)、次高风险(4级)和最高风险(5级)。该风险模型可在气象灾害风险管理业务中进行应用，为地方交通运输部门防灾减灾救灾工作提供科学依据。

关 键 词：暴雨洪涝灾害；致灾因子；孕灾环境；承灾体；防灾减灾能力；风险模型；青海省

文章编号：1000－6060(2024)01－0028－10(0028～0037)

近年来全球气候变暖，各地极端天气引发的气象灾害呈明显上升趋势[1]。气象灾害是气象条件超出承灾体承受能力从而产生灾损的事件，它既与气象条件有关，也与承灾体本身的脆弱性有关。当气象条件达到临界值时，相应灾害就有可能出现，此临界值称为致灾临界气象条件。构成自然灾害的2个基本要素，首先是自然灾害为自然界发生的事件，其次是这种事件能够直接造成人类社会的损失或灾难。自然灾害中暴雨洪涝是最为严重的一种灾害[2]，造成的经济损失占所有自然灾害损失的60%以上[3]。气象灾害风险评估是在定量评价暴雨洪涝风险的基础上，研究气象灾害的空间分布特征，建立分灾种的防灾减灾服务模式，对降低气象灾害风险、减轻气象灾害损失具有重要意义。公路交通安全运行和管理对气象条件的敏感性逐渐增大[4-14]，青海是青藏高原主体的一部分，是我国气候环境变化的敏感与脆弱区，近年来暴雨洪涝灾害研究主要集中在暴雨发生发展规律和影响机理上，在风险评估与区划方面的研究还比较少，主要是受地理因素、基础资料难以获取、技术方法不健全等原因导致。保广裕等[15-18]对青海省道路结冰变化时空分布特征及其影响等级划分进行了研究，建立了地面温度、积雪深度的预报模型，依据道路结冰持续时间划分了交通安全运行影响气象等级；同时，研究了京藏高速柴达木腹地路面温度变化特征及气温要素影响分析、青海省公路沿线强降雪天气灾害风险区划方法等。国内外学者做了相关研究，如针对淮河、大通河等流域的暴雨洪水灾害风险评估研

收稿日期：2023-06-15； **修订日期：**2023-08-15

基金项目：国家自然科学基金项目(42165014)；西宁市科技计划项目(2023-M-06)资助

作者简介：张静(1983-)，女，硕士研究生，副高级工程师，主要从事专业气象预报和服务研究. E-mail: 13997057589@163.com

通讯作者：保广裕(1967-)，男，正高级工程师，主要从事专业气象预报和服务研究. E-mail: baogy123@163.com

究[19-21]，针对新疆、江西、四川等地采用云模型或基于GIS建立的暴雨洪水灾害风险评估方法[22-28]。但在强降雨引发青海省公路沿线暴雨洪涝灾害风险方面研究尚处在初期阶段。因此，本文利用青海省公路沿线降水量、地形起伏度、植被覆盖度、人口密度、地均耕地面积、地均大牲畜数量、地均可利用草场面积、人均GDP等资料，开展强降水风险技术在公路交通专业气象服务中的应用研究，以便提升气象服务的科技含量和预报服务能力。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

青海省地处中国西部，位于青藏高原的东北部，境内山脉高耸，湿地资源丰富，属于典型高原大陆性气候，是黄河、长江和澜沧江的源头地。全省东西长1200 km，南北宽800 km，平均海拔3000 m以上，地势总体呈西高东低态势。降水季节变化特点明显，年降水量中5—9月份占70%以上，且由东南向西北逐渐减少，省内西部和北部地区年平均降水量在400 mm以下。2022年，青海省实现生产总值3610.07×10^{8}元。截至2022年底，公路通车里程8.77×10^4 km，其中高速公路3790×10^4 km。受降水和地形的共同影响，青海境内公路沿线山洪、泥石流等灾害频发。

1.2　资料来源

通过2012年1月—2021年12月青海省公路沿线50个国家气象站和39个交通气象站的逐日降水量，统计得到不同强度降水日数。2016—2018年青海省各市县的国土面积、播种面积、人口数量、国内生产总值（GDP）和牲畜数量等指标的平均值均源自《青海省统计年鉴》。植被覆盖度河网数据、地形高程、行政区划等基础地理信息数据提取自国家信息中心下发的1:250000 GIS地图。暴雨洪涝的基本信息、灾害类型、数据集成资料源自青海省气象灾情数据库。选取青海省内5条国道和3条省道开展青海公路沿线暴雨洪涝灾害风险模型研究。研究线路及气象站点分布如图1所示。

1.3　研究方法

应用无量纲化、层次分析法、自然断点法和综合指数法等统计学方法，将指标进行归一化处理，消除量纲差异[29]。暴雨洪涝的危险性、脆弱性、暴

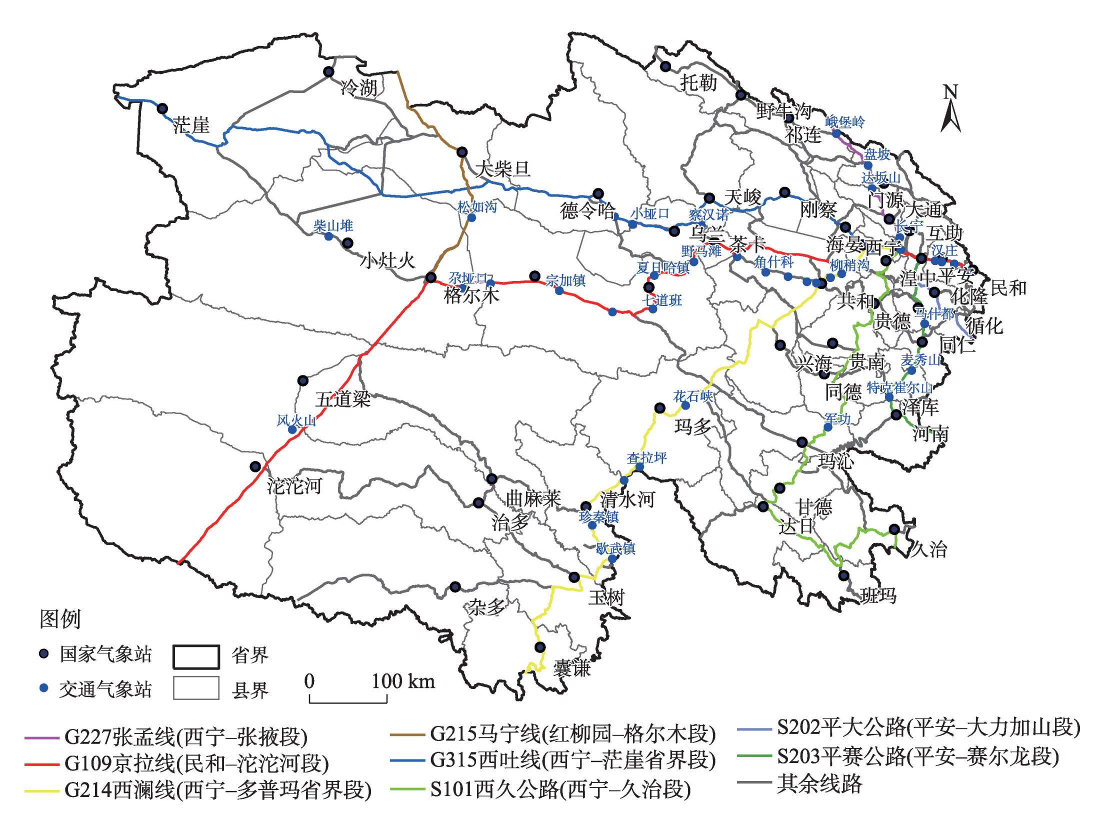


图1　青海省公路主要研究线路及气象站点分布

Fig. 1　Distribution of main highway research routes and meteorological stations in Qinghai Province

露性等指标归一化计算公式为：

$$D_{ij}=0.5+0.5\times\frac{A_{ij}-A_{i\min}}{A_{i\max}-A_{i\min}} \quad (1)$$

式中：D_{ij} 为j站点第i个指标的归一化值；A_{ij} 为j站点的第i个指标值；$A_{i\max}$ 和 $A_{i\min}$ 分别为第i个指标值中最大和最小的2个指标值。要使气象灾害的风险性越小，就需要增强气象灾害防灾减灾能力，所以防灾减灾能力的归一化和其他指标的不一样，其计算公式为：

$$D_{ij}=1.0-0.5\times\frac{A_{ij}-A_{i\min}}{A_{i\max}-A_{i\min}} \quad (2)$$

各项评价因子指数均采用加权综合评价法计算，该方法将各指标对整体因子的影响程度考虑在内，其计算公式为：

$$V_t=\sum_{i=1}^{n}W_i\times D_{it} \quad (3)$$

式中：V_t 为评价因子的总价值；W_i 为指标i的权重；D_{it} 为指标i因子t的归一化值；n为评价指标的个数。

利用层次分析法计算各因子的权重，是以一种标度客观地量化人的主观判断，具体方法可参考相关文献[30-31]。建立暴雨洪涝风险预报模型时，依据自然灾害风险评估原理和评价指标体系，利用加权综合评价法，其公式为：

$$\mathrm{MDRI}=aV_{\mathrm{D}}\times bV_{\mathrm{h}}\times cV_{\mathrm{s}}\times dV_{\mathrm{r}} \quad (4)$$

式中：MDRI为暴雨洪涝灾害风险预报的综合模型，表示暴雨洪涝风险程度，MDRI值越大，表示暴雨洪涝风险程度越大；V_{D} 、V_{h} 、V_{s} 、V_{r} 分别为按照公式(3)加权综合评价法计算得出的暴雨洪涝危险性指数、暴露性指数、脆弱性指数和防灾减灾能力指数；a 、b 、c 、d 为所评价因子的权重。

1.4 风险指标的选取和计算

选取青海省公路交通沿线不同等级降水量作为暴雨洪涝致灾因子风险指数；选取各地植被覆盖度、地形起伏度和河网密度作为孕灾环境风险指数；选取人口密度、地均耕地面积、地均大牲畜数量、地均可利用草场面积等指标作为承灾体风险指数；防灾减灾能力风险指数选取人均GDP。风险指标和权重采用层次分析法分析计算，见表1。采用自然断点法，将致灾因子、孕灾环境、承灾体、防灾减灾能力等划分为最高、较高、中等、较低、低5个等级，对青海省境内主要公路交通沿线暴雨洪涝灾害风险区域按照最高风险、较高风险、中等风险、较低风险和低风险区域进行划分[32]。

根据青海省气象灾害地方标准规定[33]：24 h降水量≥50.0 mm或12 h降水量≥30 mm或1 h降水量≥16 mm即为暴雨，10.0 mm≤日降水量≤24.9 mm为中雨，0.1 mm≤日降水量≤9.9 mm为小雨。依据此标准，青海省主要公路沿线出现暴雨的频次较少，故将24 h降水量≥25.0 mm及以上降水日数统称为强降雨。因公路沿线气象站点的年均强降雨日数一般不足1 d，所以计算得出气象站点的年累积强降雨日数、年均小雨日数和年均中雨日数进行标准化处理，并将其作为暴雨洪涝灾害风险的致灾因子。

2 结果与分析

2.1 致灾因子空间分布特征

2.1.1 不同降雨日数空间分布特征 青海省公路沿线不同降雨日数空间分布总体呈现由东南向西北

表1 青海省暴雨洪涝灾害风险指标因子、权重和数据类型

Tab. 1 Index factors, weights and data types of rainstorm flood disaster risk in Qinghai Province

目标层因子	权重	因素层因子	权重	数据类型
致灾因子	0.42	年均小雨日数/d	0.10	气象数据
		年均中雨日数/d	0.30	气象数据
		年累积强降雨日数/d	0.60	气象数据
孕灾环境	0.25	地形起伏度/%	0.26	环境数据
		河网密度/km·km^{-2}	0.42	环境数据
		植被覆盖度/%	0.32	环境数据
承灾体	0.21	人口密度/人·km^{-2}	0.11	人口密度数据
		地均耕地面积/m^2	0.35	耕地密度数据
		地均大牲畜数量/头	0.30	地均大牲畜数量
		地均可利用草场面积/hm^2	0.24	可利用草场面积
防灾减灾能力	0.12	人均GDP/10^{4}元·人$^{-1}$	1.00	人均GDP

递减的趋势，降雨影响的最主要路段包括：省道S101线的湟中路段、贵南路段、达日-久治路段，S203线的河南路段、泽库路段；国道G227线的大通路段、门源路段，G315线的海晏路段、刚察路段，G214线的囊谦路段。由2012—2021年青海省公路沿线年均小雨日数空间分布（图2a）可见，青海省公路沿线小雨日数影响的主要路段包括：国道G214线的查拉坪-囊谦路段；省道S101线的玛沁-久治路段，S203线麦秀山-河南路段。由年均中雨日数空间分布（图2b）可见，青海省公路沿线中雨日数影响的主要路段包括：国道G227线的西宁-峨堡岭路段，G214线的西宁-共和、歇武镇-囊谦路段；省道S101线的贵南-久治路段，S203线的麦秀山-河南路段。

由青海省公路沿线年累积强降雨日数空间分布（图2c）可见，青海省公路沿线累积强降雨日数影响的主要路段包括：国道G109线的民和-柳稍沟路段，G227线的西宁-祁连路段，G214线的西宁-共和路段，G315线的西宁-天峻路段；省道S101线的贵南-玛沁、班玛-久治路段，S202线的平安-循化路段，S203线的平安-河南路段。

2.1.2　致灾因子风险指数空间分布特征　应用青海省公路沿线年累积强降雨日数、年均小雨日数和年均中雨日数3个指标计算出暴雨洪涝致灾因子风险指数空间分布（图3a）。运用GIS自然断点分级法划

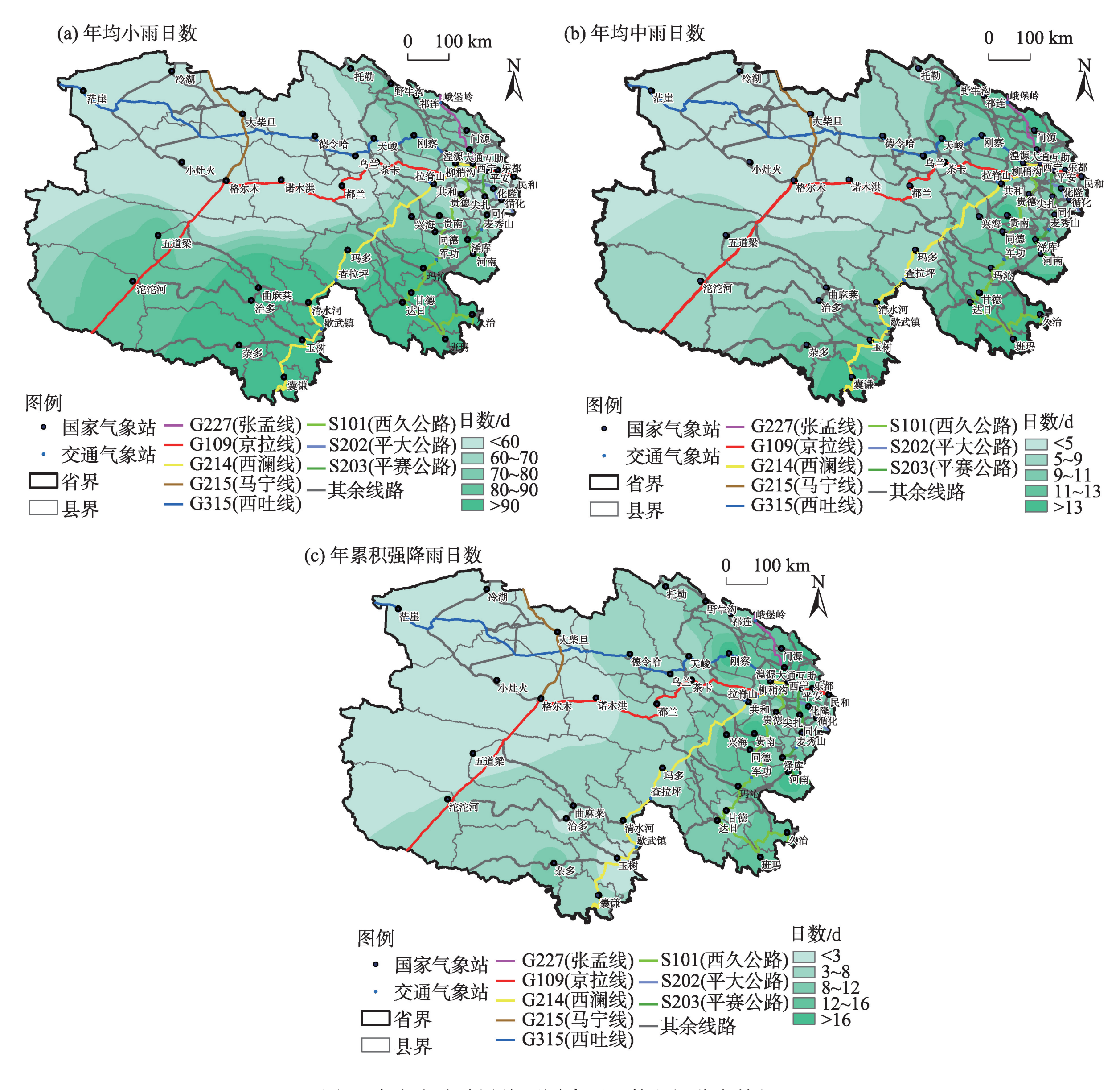


图2　青海省公路沿线不同降雨日数空间分布特征

Fig. 2　Spatial distribution characteristics of different rainfall days along highways in Qinghai Province

分致灾因子危险性大小，分别为最高风险区、次高风险区、中等风险区、次低风险区、低风险区。由图3a可见，青海省公路沿线暴雨洪涝致灾因子的危险性呈现东高西低特征，这与不同强度降水日数空间分布较为一致。青海省公路沿线暴雨洪涝致灾因子风险性最高风险区至次高风险区路段包括：国道G315线的西宁–天峻路段，G227线的西宁–峨堡岭路段；省道S101线的西宁–久治路段和S203线的泽库–河南路段。

2.2 孕灾环境风险指数空间分布特征

从青海省公路沿线暴雨洪涝孕灾环境风险指数空间分布（图3b）可以看出，青海省公路沿线暴雨孕灾环境脆弱性风险自东南、东北逐渐向西降低，其中孕灾环境脆弱性风险较高地区主要在海北、海南、果洛北部和玉树东北地区。孕灾环境脆弱性风险较低地区主要在西部和西北部地区。而在青海省东部的黄南、果洛南部和青海湖地区，孕灾环境脆弱性表现为中等和较低风险区。对应青海省公路沿线孕灾环境脆弱性风险较高的路段包括：国道G227线的祁连路段，G214线的共和–囊谦路段，以及省道S101线的贵德–玛沁路段。

2.3 承灾体风险指数空间分布特征

承灾体是受暴雨洪涝威胁的主体，由人口密度、地均耕地面积、地均大牲畜数量、地均可利用草场面积4个指标计算得到暴雨洪涝承灾体风险指数空间分布（图4a）可见，承灾体暴露性的最高风险区主要集中在青海省东部地区，是青海省人口相对集中的地区，同时也是主要的农业种植区，该地区公路桥梁、隧道等道路形态较为复杂，过境车流量和出入境车流量较大。对应青海省公路沿线承灾体暴露性的最高风险路段包括：国道G109线的民和–共和路段，G315线的西宁–刚察路段，G227线的西宁–峨堡岭路段，G214线的西宁–兴海路段；省道S101线的西宁–贵德路段，S202线的平安–循化路段，S203线的平安–麦秀山路段。

2.4 防灾减灾能力风险指数空间分布特征

防灾减灾能力是指受暴雨洪涝影响地区所具有的灾害抵御能力及灾后恢复能力，与地方经济发展水平有关。人均GDP越大，地方经济水平越高，防灾减灾能力就越强，所以将人均GDP作为防灾减灾能力的体现。从青海省公路沿线暴雨洪涝防灾减灾能力风险指数空间分布（图4b）可以看出，防灾减灾能力较高的区域主要分布在青海省西宁、海东、海北东部和海西西部地区。防灾减灾能力较高路段包括：国道G109线的民和–共和路段、格尔木路段，G315线的西宁–刚察路段、大柴旦–茫崖路段，G227线的西宁–祁连路段，G214线的西宁–兴海路段；省道S101线的西宁–贵德路段，S202线的平安–

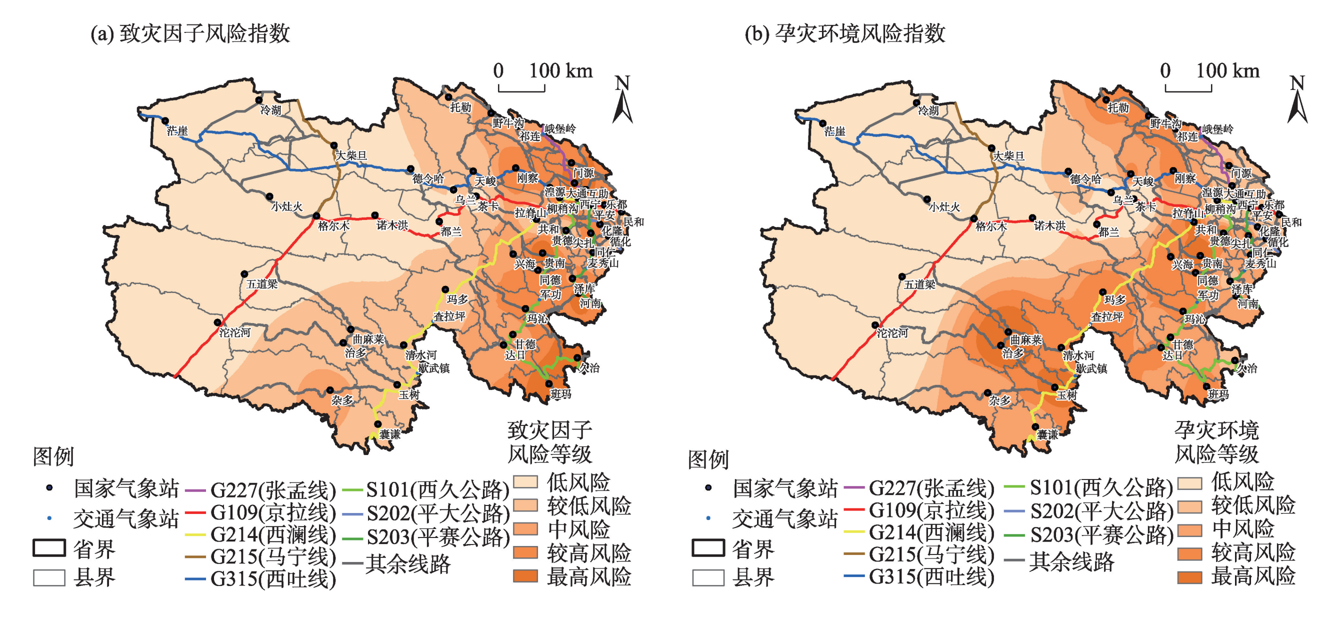


图3 青海省公路沿线致灾因子和孕灾环境风险指数空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of disaster-causing factors and disaster-pregnant environmental risk indices along highways in Qinghai Province

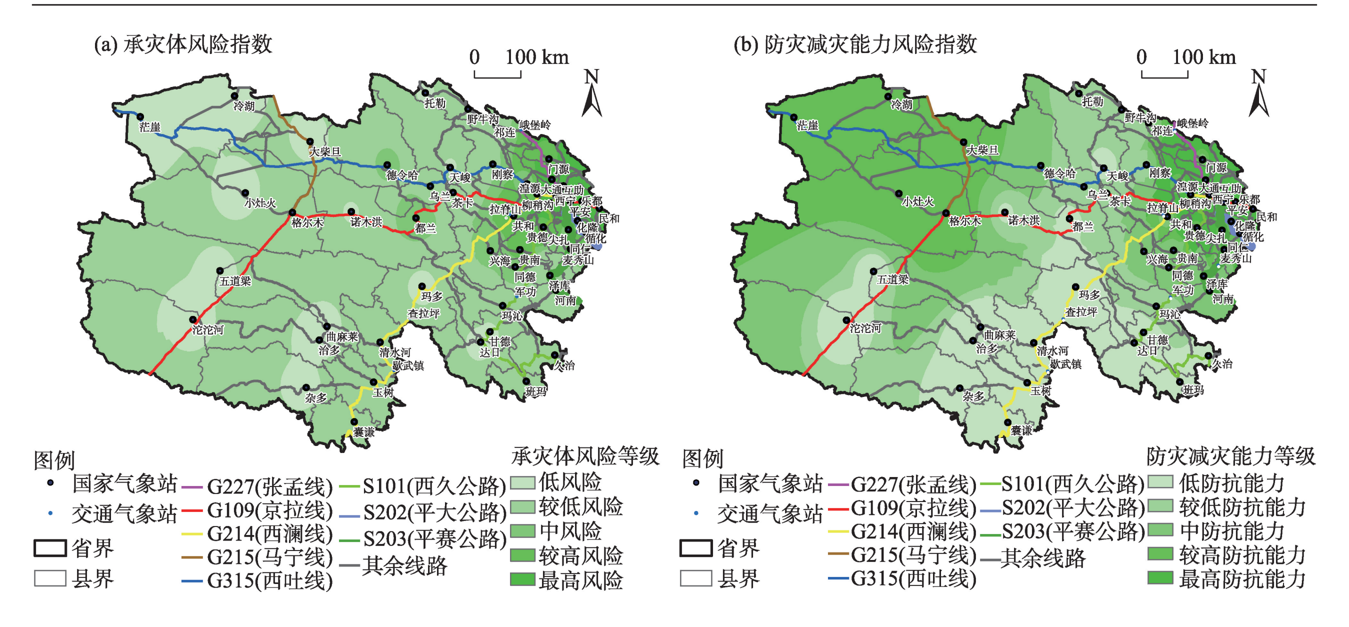


图4　青海省公路沿线承灾体和防灾减灾能力风险指数空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of risk indices of disaster bearing bodies and disaster prevention and reduction capability along highways in Qinghai Province

循化路段，S203线的平安–同仁路段。

2.5　暴雨洪涝风险综合指数等级分布特征

在青海省公路沿线暴雨洪涝灾害各指标因子定量分析的基础上，将暴雨洪涝灾害风险综合指数划分为最高风险区、较高风险区、中等风险区、较低风险区、低风险区5个风险等级区，从青海省公路沿线暴雨洪涝风险综合指数等级分布（图5）可以看出，青海省公路沿线暴雨洪涝综合风险较高至最高风险路段包括：国道G109线的民和–共和路段，G315线的西宁–刚察路段，G227线的西宁–峨堡岭路段，G214线的西宁–兴海路段；省道S101线的西宁–玛沁、班玛–久治路段，S202线的平安–循化路段，S203线的平安–同仁路段。

2.6　暴雨洪涝灾害风险模型

在分析青海省主要公路沿线暴雨洪涝发生发展规律、时空分布特征和不同强度降雨日数空间分布特征的基础上，总结暴雨洪涝致灾因子风险指数、孕灾环境风险指数、承灾体风险指数、防灾减灾能力风险指数及风险综合指数等级分布特征，确定了公路沿线暴雨洪涝灾害风险的孕灾环境、气象风险及防灾减灾能力，揭示了降水与暴雨洪涝的关系，同时将孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力指数值进行归一化处理，在致灾因子危险性选取了暴雨洪涝综合特征的基础上，加上孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力的修正系数，最终得到暴雨洪涝灾害风险模型。利用加权综合评价法，依据式（4）建立了青海省公路沿线暴雨洪涝灾害风险模型。按照模型指数等级（表2）分为5级，分别为1级、2级、3级、4级和5级，最高级别为5级，分别表示暴雨洪涝灾害风险为最低风险、次低风险、中等风险、次高风险和最高风险。

3　结 论

（1）青海省公路沿线不同强度降雨日数空间分布总体呈现由东南向西北递减的趋势，降雨影响的最主要路段是省道S101线的湟中路段、贵南路段、达日–久治路段，S203线的河南路段、泽库路段；国道G227线的大通路段、门源路段，G315线的海晏路段、刚察路段，G214线的囊谦路段。

（2）暴雨洪涝致灾因子的危险性越高，其造成洪涝的风险性也随之越高，而不同等级降水量在一定程度上可以体现暴雨洪涝灾害的强度及其影响时间。暴雨洪涝致灾因子危险性最高风险区至次高风险区路段包括：国道G315线的西宁–天峻路段、G227线的西宁–峨堡岭路段，以及省道S101线的西宁–久治路段和S203线的泽库–河南路段。

（3）暴雨洪涝孕灾环境脆弱性风险整体自东南、东北向西逐渐降低，孕灾环境脆弱性风险较高的路段包括：国道G227线的祁连路段、G214线的共

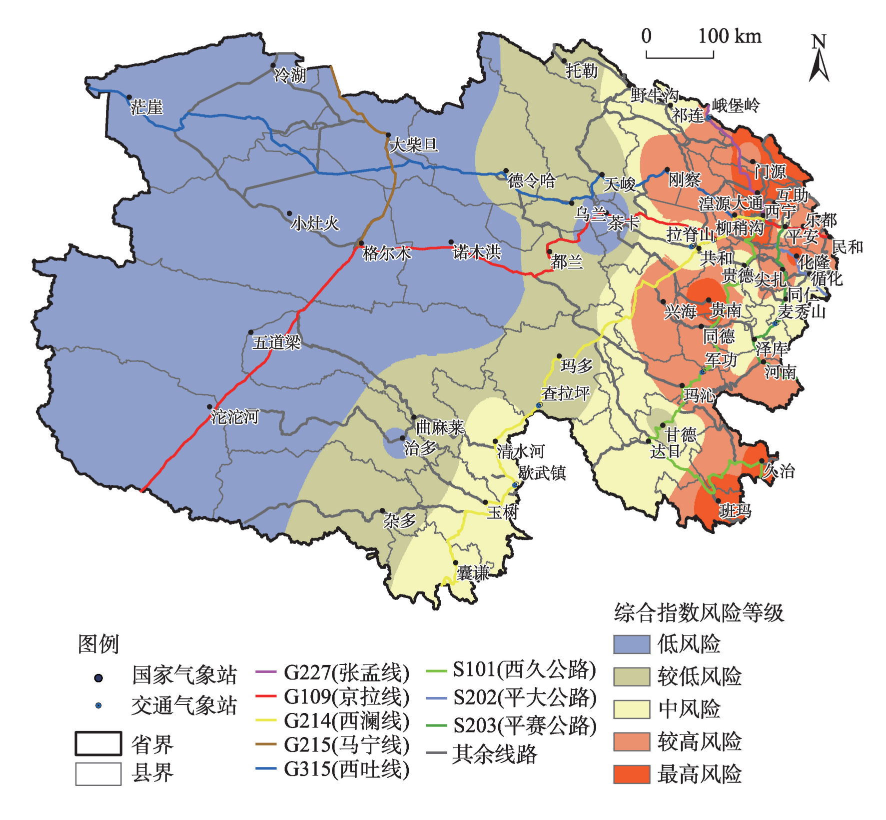


图5 青海省公路沿线暴雨洪涝风险综合指数等级分布

Fig. 5 Distribution of rainstorm and flood risk comprehensive index along highways in Qinghai Province

表2 青海省公路沿线暴雨洪涝灾害风险模型等级划分标准

Tab. 2 Classification criteria of rainstorm flood hazard risk models along highways in Qinghai Province

等级	强降水	评估风险	影响建议
1级	MDRI≤0.58	最低风险	暴雨洪涝灾害风险很小,对交通无影响。
2级	0.58<MDRI≤0.61	次低风险	暴雨洪涝灾害风险较小,对交通影响不大。
3级	0.61<MDRI≤0.63	中等风险	暴雨洪涝灾害风险较大,对交通影响较大。
4级	0.63<MDRI≤0.65	次高风险	暴雨洪涝灾害风险很大,对交通运行影响很大。
5级	MDRI>0.65	最高风险	暴雨洪涝灾害风险极大,对交通运行影响极大。

注:MDRI为暴雨洪涝灾害风险预报综合模型。

和-囊谦路段和省道S101线的贵德-玛沁路段;承灾体暴露性的最高风险区主要集中在国道G109线的民和-共和路段、G315线的西宁-刚察路段、G227线的西宁-峨堡岭路段、G214线的西宁-兴海路段,以及省道S101线的西宁-贵德路段、S202线的平安-循化路段和S203线的平安-麦秀山路段。

(4) 防灾减灾能力较高的区域主要分布在青海省西宁、海东、海北东部和海西西部等路段,防灾减灾能力较高路段包括:国道G109线的民和-共和路段、格尔木路段,G315线的西宁-刚察路段、大柴旦-茫崖路段,G227线的西宁-祁连路段,G214线的西宁-兴海路段,以及省道S101线的西宁-贵德路段、S202线的平安-循化路段和S203线的平安-同仁路段。

(5) 在暴雨洪涝灾害各指标因子定量评估的基础上,将公路沿线暴雨洪涝综合风险指数划分为5个风险等级区,暴雨洪涝灾害的最高风险区主要分布在青海省东部地区。公路沿线暴雨洪涝综合风险较高至最高风险区路段包括:国道G109线的民和-共和路段、G315线的西宁-刚察路段、G227线的西宁-峨堡岭路段、G214线的西宁-兴海路段,以及省道S101线的西宁-玛沁和班玛-久治路段、S202线的平安-循化路段和S203线的平安-同仁路段。

(6) 通过青海省公路沿线暴雨洪涝致灾因子风

险指数、孕灾环境风险指数、承灾体风险指数、防灾减灾能力风险指数及风险综合指数等级分布特征的基础上，构建了公路沿线暴雨洪涝灾害风险模型。青海省公路沿线暴雨洪涝灾害风险模型指数等级分为5级，分别为1级、2级、3级、4级和5级，5级为最高级别，分别表示暴雨洪涝风险为最低风险、次低风险、中等风险、次高风险和最高风险。

参考文献（References）

[1] 黄荣辉, 杜振彩. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势[J]. 自然杂志, 2010, 32(4): 187-195. [Huang Ronghui, Du Zhencai. Evolution characteristics and trends of droughts and floods in China under the background of global warming[J]. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(4): 187-195.]

[2] 史培军. 中国自然灾害、减灾建设与可持续发展[J]. 自然资源学报, 1995, 10(3): 267-278. [Shi Peijun. The natural disasters, constructions works for disaster reduction and sustainable development of China[J]. Journal of Natural Resources, 1995, 10(3): 267-278.]

[3] 何宗宜, 韩用顺. 基于GIS技术的洪水淹没计算分析系统[J] . 地理空间信息, 2003, 1(3): 5-7. [He Zongyi, Han Yongshun. Flood drowning analysis system based on GIS[J]. Geospatial Information, 2003, 1(3): 5-7.]

[4] 刘艳, 何清, 戴晓爱, 等. 新疆铁路沿线主要气象灾害风险区划及减灾对策探讨[J]. 自然灾害学报, 2016, 27(3): 48-57. [Liu Yan, He Qing, Dai Xiaoai, et al. Risk mapping of main meteorological disasters and disaster mitigation startegies for Xinjiang Railway lines[J] . Journal of Natural Disasters, 2016, 27(3): 48-57.]

[5] 汪超, 罗喜平. 基于GIS的贵州省道路结冰灾害风险区划分析[J]. 高原山地气象研究, 2017, 38(3): 71-77. [Wang Chao, Luo Xiping. Analysis of icy road disaster risk zoning in Guizhou Province base on GIS[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2017, 38(3): 71-77.]

[6] 董鹏捷, 王建捷. 北京地区冰雹灾害风险评估模型及风险区划[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(1): 29-34. [Dong Pengjie, Wang Jianjie. Risk assessment model and regionalization of hail disaster in Beijing area[J]. Torrential Rain and Disasters, 2012, 31(1): 29-34.]

[7] 代娟, 崔新强, 刘文清, 等. 高速铁路气象灾害风险分析与区划方法探讨[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 33-36. [Dai Juan, Cui Xinqiang, Liu Wenqing, et al. Research on meteorological disaster risk analysis and regionalization in high speed railway[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 33-36.]

[8] 高展, 许剑勇, 王胜, 等. 黄山风景区暴雨山洪灾害风险区划研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(3): 281-285. [Gao Zhan, Xu Jianyong, Wang Sheng, et al. Research on regional risk zonation of mountain torrent disasters in Huangshan Scenic Area[J]. Torrential Rain and Disasters, 2015, 34(3): 281-285.]

[9] 朱小凡, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2012年青海省降雪初始终止日期和降雪日数时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 761-770. [Zhu Xiaofan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Spatiotemporal variation patterns of the beginning and ending dates of snowfall, and snowfall days in Qinghai Province during 1962 to 2012[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(3): 761-770.]

[10] 宁贵财, 康彩燕, 陈东辉, 等. 2005—2014年我国不利天气条件下交通事故特征分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 753-762. [Ning Guicai, Kang Caiyan, Chen Donghui, et al. Analysis of characteristics of traffic accidents under adverse weather conditions in China during 2005—2014[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(5): 753-762.]

[11] 陈晓光, 李俊超, 李长林, 等. 风吹雪对公路交通的危害及其对策研讨[J]. 公路, 2001, 46(6): 113-118. [Chen Xiaoguang, Li Junchao, Li Changlin, et al. Study on the hazards of wind-blown snow in highway traffic and its countermeasures[J]. Highway, 2001, 46(6): 113-118.]

[12] 胡钰玲, 康延臻, 杨旭, 等. 2008—2015年北京高速公路道面结冰特征分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 811-823. [Hu Yuling, Kang Yanzhen, Yang Xu, et al. An analysis of the temporal-spatial characteristics of highway surface freezing in Beijing from 2008 to 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 811-823.]

[13] 李刚, 罗喜平, 韩晓令. 贵州中西部道路结冰气象影响因子检验评估[J]. 贵州气象, 2016, 55(4): 6-10. [Li Gang, Luo Xiping, Han Xiaoling. Validation and assessment of road icing impact factors in midwest of Guizhou[J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2016, 55(4): 6-10.]

[14] 罗生洲, 汪青春, 戴升. 青海省气象灾害的若干气候特征分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1380-1387. [Luo Shengzhou, Wang Qingchun, Dai Sheng. An analysis of climatic characteristics of meteorological disasters in Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1380-1387.]

[15] 保广裕, 王文英, 张景华, 等. 青海省路结冰变化时空分布特征及其影响等级划分[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 104-110. [Bao Guangyu, Wang Wenying, Zhang Jinghua, et al. Temporal-spatial distribution of road icing in Qinghai and its impact[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(1): 104-110.]

[16] 保广裕, 周丹, 郑玲, 等. 青海省公路沿线强降雪天气灾害风险区划方法研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 109-116. [Bao Guangyu, Zhou Dan, Zheng Ling, et al. A study of severe snowfall disaster risk zoning along highway in Qinghai Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(4): 109-116.]

[17] 保广裕, 杨春华, 周丹, 等. 京藏高速柴达木腹地路面温度变化特征及与气温要素影响分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1213-1221. [Bao Guangyu, Yang Chunhua, Zhou Dan, et al. Variation characteristics of road surface temperature and its influence on air temperature factors of Beijing- Tibet Expressway in the Qaidam Hinterland[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1213-1221.]

[18] 代青措, 保广裕, 祁栋林, 等. 京藏高速青海东部地区汛期路面水膜厚度变化特征及预报模型构建[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1814-1823. [Dai Qingcuo, Bao Guangyu, Qi Donglin, et al. Variation characteristics of pavement water film thickness in flood season and construction of forecast model for Beijing-Tibet Expressway in the eastern part of Qinghai[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1814-1823.]

[19] 陈真莲. 小流域山洪灾害成因及防治技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. [Chen Zhenlian. Study on cause and prevention technology of mountain torrent disaster in small watershed[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.]

[20] 谢五三, 田红, 卢燕宇. 基于FloodArea模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(4): 384-387. [Xie Wusan, Tian Hong, Lu Yanyu. Risk evaluation of rainstorm and flood disasters in Datong River Basin based on the flood area model[J]. Torrential Rain and Disasters, 2015, 34(4): 384-387.]

[21] 刘家福, 李京, 刘荆, 等. 基于GIS/AHP集成的洪水灾害综合风险评价:以淮河流域为例[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 110-114. [Liu Jiafu, Li Jing, Liu Jing, et al. Integration GIS/AHP-based flood risk assessment: A case study of Huaihe River Basin in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(6): 110-114.]

[22] 管珉, 陈兴旺. 江西省山洪灾害风险区划初步研究[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(4): 339-343. [Guan Min, Chen Xingwang. Research of regional torrent risk zonation in Jiangxi Province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2007, 26(4): 339-343.]

[23] 甘薇薇, 范江琳, 肖天贵, 等. 四川省暴雨过程综合评估模型的研究及建立[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1336-1343. [Gan Weiwei, Fan Jianglin, Xiao Tiangui, et al. Research and establishment of a comprehensive evaluation model of rainstorm process in Sichuan Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1336-1343.]

[24] 王慧, 毛炜峄, 李元鹏, 等. 新疆易灾暴雨的风险区划[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1407-1413. [Wang Hui, Mao Weiyi, Li Yuanpeng, et al. Risk zoning of torrential rain which easily causes damage in Xinjiang region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1407-1413.]

[25] 苏军锋, 肖志强, 魏邦宪, 等. 基于GIS的甘肃省陇南市暴雨灾害风险区划[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 650-655. [Su Junfeng, Xiao Zhiqiang, Wei Bangxian, et al. The risk zoning of rainstorm based on GIS in Longnan of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(4): 650-655.]

[26] 万昔超, 殷伟量, 孙鹏, 等. 基于云模型的暴雨洪涝灾害风险分区评价[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 77-83. [Wan Xichao, Yin Weiliang, Sun Peng, et al. Risk division assessment of rainstorm-flood disasters based on cloud model[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4): 77-83.]

[27] 唐川, 朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 87-94. [Tang Chuan, Zhu Jing. A GIS based regional torrent risk zonation[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 87-94.]

[28] 祁元, 刘勇, 杨正华, 等. 基于GIS的兰州滑坡与泥石流灾害危险性分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 96-104. [Qi Yuan, Liu Yong, Yang Zhenghua, et al. GIS-based analysis of landslide and debris flow hazard in Lanzhou[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 96-104.]

[29] 李美娟, 陈国宏, 陈衍泰. 综合评价中指标标准化方法研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(10): 45-48. [Li Meijuan, Chen Guohong, Chen Yantai. Study on target standardization method of comprehensive evaluation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2004, 12(10): 45-48.]

[30] Karhunen J, Joutsensalo J. Representation and separation of signals using nonlinear PCA type learning[J]. Neural Networks, 1994, 7(1): 113-127.

[31] Chen Y L, Zheng Y F. Face recognition for target detection on PCA features with outlier information[C]//50th Midwest Symposiumon Circuits and Systems. Montreal: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2007: 823-826.

[32] 李万志, 余迪, 冯晓莉, 等. 基于风险度的青海省暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 680-688. [Li Wanzhi, Yu Di, Feng Xiaoli, et al. Risk assessment of rainstorm and flood disasters based on the hazard grades/indices in Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 680-688.]

[33] DB63/T372-2018. 青海省地方标准: 气象灾害标准[S]. 西宁: 青海省质量技术监督局, 2018. [DB63/T372-2018. Local standard of Qinghai Province: Meteorological disaster standard[S]. Xining: Qinghai Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2018.]

Characteristics and model of rainstorm and flood disaster risk index along Qinghai Highway

ZHANG Jing[1], BAO Guangyu[1], LIU Wei[1], YANG Chunhua[1], YAN Zhenning[1], DAI Qingcuo[1], FU Yongchao[2]

(1. Meteorological Service Center of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China;
2. Qilian County Meteorological Bureau of Qinghai Province, Qilian 810400, Qinghai, China)

Abstract: Based on daily precipitation and geographic and socioeconomic data collected from 50 national and 39 traffic meteorological stations in Qinghai Province of China from January 2012 to December 2021, this study analyzes the spatiotemporal distribution and characteristics of rainfall intensities along the highway. The analytic hierarchy process and natural breakpoint methods were applied to summarize the risk indices of rainstorms and flood disasters. These indices include the disaster-bearing environment, meteorological risk, and disaster prevention and reduction capability. By integrating these factors, a rainstorm and flood disaster risk model for a highway in Qinghai Province was developed. The key findings are as follows: (1) The spatial distribution of rainfall days along highways decreases from southeast to northwest. High-risk areas include the Xining-Tianjun section of National Highway G315 and the Xining-Ebaoling section of National Highway G227. (2) Environmental vulnerability risk gradually decreases from the southeast and northeast to the west. High-risk areas include the Qilian section of National Highway G227 and the Gonghe-Nangqian section of National Highway G214. (3) The risk of disaster body exposure is concentrated in the Minhe-Gonghe section of National Highway G109 and the Xining-Ebaoling section of National Highway G227. (4) Regions with high disaster prevention and reduction capability are mainly Xining City, Haidong City, east Haibei Prefecture, and west Haixi Prefecture. (5) The rainstorm and flood disaster risk model, categorized into five levels (lowest, low, medium, high, and higher risk), offers a practical tool for meteorological disaster risk management and provides a scientific basis for local transportation departments’ disaster prevention and relief efforts.

Key words: rainstorm and flood disaster; disaster causing factor; disaster-prone environment; disaster bearing body; disaster prevention and mitigation capacity; risk model; Qinghai Province